Über die Bestimmung

des

Temperaturcoëfficienten

nach einer

Compensationsmethode.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von

Max Töwe,

Ingenieur aus Berlin.

Parchim i. M.
Druck von G. Gerlach.
1896.

Über die Bestimmung

des

Temperaturcoëfficienten

nach einer

Compensationsmethode.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von

Max Töwe,

Ingenieur aus Berlin.

Parchim i. M.
Druck von G. Gerlach.
1896.

Referent: Herr Professor Dr. L. Matthiessen.

S. L. PFLEGEVATER

HERRN ADOLPH THIEM

IN HERZLICHER DANKBARKEIT

GEWIDMET.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552726_0045

Der erste, welcher eine Beziehung zwischen der Temperatur eines Drahtes und seiner Leitungsfähigkeit feststellte, war Humphry Davy[1]), ein bedeutender Physiker zu Anfang unseres Jahrhunderts. Er fand, dass mit steigender Temperatur die Leitfähigkeit ab-, oder was dasselbe sagen will, der Widerstand zunimmt, und gab als unwiderleglichen Beweis dafür folgenden höchst anschaulichen Versuch, der vielleicht nicht allgemein bekannt ist.

Eine starke Voltasche Säule schloss er kurz durch einen Draht von den Dimensionen, dass er durch den Strom gerade in schwache Rotglut gebracht wurde. Sobald Davy hierauf eine Stelle des Drahtes durch eine Flamme bis zur Weissglut erhitzte, hörte der übrige Teil desselben gänzlich zu glühen auf. Die Erklärung dieser an sich auffallenden Erscheinung konnte nur darin zu suchen sein, dass der Widerstand durch die Erwärmung derartig erhöht wurde, dass der Strom nicht mehr ausreichte, um den Leiter in Rotglut zu erhalten.

Kühlte Davy jedoch eine Stelle des glühenden Drahtes ab, so musste nach seiner Theorie der Widerstand sich

---

[1]) Phil. Transactions. 1821, Ic.

verringern, der im Kreise wirksame Strom also wachsen. Das Experiment bestätigte diese Annahme, indem der Draht sofort stärker glühte.

Auf Grund dieses Versuches wurde dann in alle Lehrbücher der Satz von der Abhängigkeit zwischen Leitungsfähigkeit und Temperatur aufgenommen, ohne dass man versucht hätte, dies Abhängigkeitsverhältnis näher zu prüfen und womöglich in Zahlen auszudrücken.

Der Grund hierfür ist wohl darin zu suchen, dass es damals — wir dürfen nicht vergessen, dass wir uns Anfang der zwanziger Jahre befinden — noch keine Möglichkeit gab, Strom und Widerstand genau zu bestimmen.

Erst Lenz[1]) nahm im Jahre 1833 die Sache wieder auf und stellte eingehende Untersuchungen an.

Wenn dieselben auch heute gar keine praktische Bedeutung mehr haben, so sind sie doch als die ersten in dieser Richtung von hinreichend historischem Interesse, um ein kurzes Verweilen bei ihnen zu rechtfertigen.

Die Messungen stützen sich auf die „Entdeckung Faradays, dass der Magnet unter geeigneten Umständen einen augenblicklichen elektrischen Strom hervorzubringen vermöge", also mit anderen Worten auf die Induktionswirkung eines Magnets auf eine Spule.

[1]) Lenz: „Über die Leitungsfähigkeit der Metalle für die Elektrizität bei verschiedenen Temperaturen". Pogg. Ann. Bd. 34, 418.

Die Versuchsanordnung war folgende: Vor einem Hufeisenmagneten befand sich ein bewickelter Anker, welcher mit einem Multiplikator und dem Messdrahte in Reihe geschaltet war. Letzterer war in Form einer Spirale über die Quecksilberkugel eines Thermometers geschoben und wurde in einem Ölbade erwärmt.

Wurde der Anker von dem Hufeisen losgerissen, so entstand im Kreise ein Stromstoss, der einen Ausschlag der Magnetnadeln des Multiplikators hervorrief. Da die Stärke des Stosses indirekt proportional dem im Kreise vorhandenen Widerstande ist, gaben die Ausschläge, welche bei Beginn der Messung und bei Erhöhung des Widerstandes durch Erwärmen beobachtet wurden, ein Mass für die Höhe der Widerstandsänderung.

Trotz dieser ungenauen Methode hat Lenz annähernd richtige Resultate erhalten. Eine Umrechnung einer grossen Reihe der von ihm angegebenen Werte ergab den Temperaturcoëfficienten im Mittel:

$$\alpha = 0{,}003288.$$

Mit der Bezeichnung „Temperaturcoëfficient“ greifen wir hier allerdings etwas vor. Die Formel, nach welcher die Leitungsfähigkeit, resp. die Widerstandsänderung bei verschiedenen Temperaturen berechnet wird, lautet bekanntlich:

$$\omega_t = \omega_0 (1 + \alpha t + \beta t^2).$$

In der Praxis hat im allgemeinen nur α Bedeutung, man nennt daher diesen Wert kurzweg den „Temperatur-coëfficienten“. —

Aus seinen Resultaten folgerte Lenz bereits die oben erwähnte Formel; er fand also, dass das Verhältnis zwischen Temperatur und Widerstandszunahme kein lineares ist und besonders bei höheren Temperaturen von der Geraden abweicht.

Durch Lenz scheint der Bann gebrochen zu sein, nach ihm hat sich eine ganze Reihe von Physikern mit der Lösung dieser Aufgabe beschäftigt. Es seien Namen genannt wie Müller[1]), Becquerel[2]) und Arndtsen[3]) — die einzelnen Arbeiten näher zu besprechen, ist hier nicht der Ort.

Somit können wir direkt übergehen zu den grundlegenden Versuchen von Aug. Matthiessen und M. v. Bose, welche sie unter dem Titel: „Über den Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit der Metalle“ im Jahre 1862 im 115. Bande der Poggend. Annalen veröffentlicht haben.

---

[1]) „Ueber die Abhängigkeit des Leitungswiderstandes der Metalle von der Temperatur.“ Pogg. Ann. $73_{,434}$.

[2]) „Untersuchung über das elektrische Leitungsvermögen starrer und flüssiger Körper.“ Pogg. Ann. $70_{,243}$.

[3]) „Ueber den galvanischen Leitungswiderstand der Metalle bei verschiedenen Temperaturen.“ Pogg. Ann. $104_{,1}$. $105_{,48}$.

Im Gegensatze zu den Vorgängern dieser beiden Physiker haben wir es hier mit einer Methode und mit Resultaten zu thun, die absolut einwandfrei sind.

Sie bedienten sich der Wheatstone-Kirchhoffschen Brückenkombination, welche ihnen eine ganz genaue Widerstandsbestimmung des Messdrahtes gestattete. Dieselbe ist zu bekannt, als dass eine Erklärung nötig wäre.

Die zur Messung bestimmten Drähte wurden in einer der Länge nach zur Hälfte abgesprengten Glasröhre in einem doppelwandigen Blechtroge voll Öl[1]) erhitzt.

Durch eine grosse Anzahl von Messungen wurden nach der bereits angeführten Formel α und β bestimmt. Für Kupfer fanden die genannten Experimentatoren nach der Methode der kleinsten Quadrate:

$$\alpha = 0{,}0037351$$

$$\beta = 0{,}000007716$$

Nach diesen Versuchen sind nur noch die von Benoist[2]) zu erwähnen; er war der einzige, wenigstens soweit die mir zugängliche Literatur Aufschluss gab, welcher sich zur Bestimmung von α und β hoher Temperaturen bedient hat. Er ging bis zu 860° und fand folgende Werte:

$$\alpha = 0{,}003637$$

$$\beta = 0{,}00000587\,t^2.$$

[1]) Pogg. Ann. 62_{535}. 1844.

[2]) Comptes rendus. 76_{342}. 1873.

Seitdem hat sich niemand mehr eingehend mit dieser Aufgabe befasst wohl aus dem einfachen Grunde, weil sie endgiltig gelöst zu sein schien, sodass sie einer erneuten Behandlung nicht bedurfte.

Trotzdem sei es im Nachfolgenden gestattet, eine neue Methode theoretisch zu entwickeln und durch Resultate zu belegen, zu welcher eine Beobachtung gelegentlich magnetischer Messungen die Veranlassung gab.

I. Teil.

Jeder, welcher nach der magnetometrischen Methode Kurven aufgenommen hat, wird die Erfahrung gemacht haben, dass, sobald beim Erzeugen stärkerer Felder eine Erwärmung der Magnetisierungsspirale stattfindet, die Nadel zu wandern beginnt.

So unangenehm diese stetige Änderung bei den erwähnten Messungen ist, so sollte sie doch in diesem Falle die Grundlage zur Bestimmung der Temperaturcoëfficienten bilden.

Die Erklärung für dieses „Wandern“ liegt ja auf der Hand: sobald der Strom ein der jeweiligen Drahtstärke entsprechendes Mass überschreitet, macht sich die Erwärmung bemerkbar, der Widerstand nimmt stetig zu, in demselben Verhältnisse der Strom und die Feldstärke ab.

Es galt nun, diese Ablenkungen in gewünschter Weise zu regeln und rechnerisch auszunutzen. Denkbar wäre folgendes Verfahren, das ich auch zuerst einzuschlagen beabsichtigte.

Man lässt ein vom Strome durchflossenes Kupfersolenoid auf die Magnetnadel eines Spiegelinstrumentes wirken und bestimmt durch gleichmässig fortschreitende Änderung der Stromstärke.

$$n = f(\mathfrak{H}).$$ [1]

Da $\mathfrak{H} = 0{,}4\ \pi \frac{n}{l}\ n\ .\ i$, also

$$= \text{const.}\ .\ i \text{ ist,}$$

erhalten wir eine Gerade und haben somit das Instrument gewissermassen geaicht.

Sobald nun der Widerstand der Spule bei konstanter Temperatur auf das Genaueste bestimmt ist, schickt man einen schwachen Strom hindurch, der während der Messung unverändert bleiben muss und seinerseits nichts zur Erwärmung des Drahtes beitragen darf.

Ändern wir nun durch Erwärmen die Leitungsfähigkeit des Solenoids, so werden wir am Galvanometer einen Ausschlag beobachten, der uns nach unserer Aichungsgeraden

$$n \quad f(\mathfrak{H}) \quad f(i)$$

ein direktes Mass giebt für die Stärke des Stromes, der thatsächlich den Kreis durchflossen hat.

Bei der Verwendung eines Accumulators und so geringer Stromentnahme können wir die Spannung während des ganzen Verlaufes der Messung als konstant

1) n = Skalenanschlag.
$\mathfrak{H}$ Feldstärke.

annehmen und finden daher aus der Stromabnahme die Widerstandszunahme der Spule bei verschiedener Temperatur, welche bei jeder Ablesung bestimmt werden muss.

Durch Kombination der Temperatur — und Widerstandsänderungen finden wir in bekannter Weise α.

Gegen ein derartiges Prinzip ist natürlich vom theoretischen Standpunkte aus nichts einzuwenden. Thatsächlich wurden einige Probemessungen nach derselben ausgeführt und ergaben zufriedenstellende Resultate.

Eins aber liess sich nicht hinwegleugnen: diese neue Methode bot gegenüber der alt bewährten gar keinen Vorzug, war also unnütz Die Brückenmethode ist ja zweifellos sehr schwierig auszuführen, und man muss alle Vorsichtsmassregeln auf das peinlichste befolgen, wenn man absolut genaue Resultate erzielen will. Aber man kann es doch; es liegt nichts im Wege, für den Temperaturcoëfficienten bis auf die 4. und 5. Stelle übereinstimmende Werte zu erhalten. Unserer Methode haftet der grosse Fehler an, dass der Widerstand erst aus der Stromstärke und Spannung gefunden werden kann.

Für Messungen im Grossen ist ja nichts gegen eine indirekte Widerstandsbestimmung einzuwenden, in unserem Falle jedoch, wo es sich um ganz kleine Widerstände und minimale Stromstärken handelt, sind die Unterschiede zu gering, als dass selbst bei noch so genauer Messung das Endresultat über einen bestimmten Grad der Genauigkeit hinauskommen könnte. —

Sollte also das „Wandern“ der Nadel zu einer neuen Methode ausgenutzt werden, so musste ein Mittel gefunden werden, um die Bestimmung des Widerstandes aus der Stromstärke entbehrlich zu machen. Es fand sich, wenn man sich so ausdrücken darf, in einer direkten Aichung des Instruments auf Widerstand.

Wie bei der vorigen Messung sei auch hier das Solenoid in geringer Entfernung von dem Magnetringe conaxial mit diesem aufgestellt.

Um aber die ganze Skala besser ausnützen zu können und allein für die Widerstandsänderung zur Verfügung zu haben, ist es nötig, die ablenkende Wirkung der Spule anfangs durch eine zweite auf der entgegengesetzten Seite des Galvanometers zu kompensieren, sodass beim Einschalten des Stromes die Nadel in ihrer Ruhelage verbleibt.

Nach dieser Abgleichung ist der Widerstand der Messspule bei einer bestimmten Temperatur, die den Ausgangspunkt der Beobachtungen bilden soll, genau festzustellen.

Schaltet man dann bei konstant erhaltener Temperatur in den Stromkreis der Spule nach einander verschiedene Normalwiderstände ein, so bekommt man verschiedene Ausschläge, die bei dem geringen Strome nur von der durch die Widerstandszunahme $\Delta\omega$ bedingten Aenderung des Feldes herrühren.

Auch hier muss die Aichungskurve, deren Gleichung jetzt:

$$n = f(\Delta\omega)$$

ist, eine Gerade ergeben, da $f(\Delta\omega)$ prop. $f(\Delta i)$ ist.

Vor Beginn der eigentlichen Messung ist es ratsam, eine oberflächliche Rechnung anzustellen, auf welchen Wert sich die Zunahme des Widerstandes bei der in Aussicht genommenen Grenze der Erwärmung belaufen wird. Zur Aichung wählt man die Vergleichswiderstände dann so, dass der grösste derselben etwas mehr beträgt, als die erwartete Zunahme. Ist dieser eingeschaltet, muss die Spule derartig eingestellt werden, dass der Ausschlag nicht über die zur Verfügung stehende Skala hinausgeht.

Natürlich wird durch ein Verschieben der Spule das Gleichgewicht gestört, man muss daher auch die Wirkung der Compensationsrolle, sei es durch Nähern oder Entfernen derselben oder Variation der Stromstärke abändern, bis die Nadel beim Ausschalten der Vergleichswiderstände wieder auf O steht

Erwärmt man nun das Solenoid in bestimmten Temperaturintervallen, so kann man durch das Fernrohr die dazu gehörigen Ausschläge ablesen, und hat dadurch direkt die Widerstandsänderung. Man greift bei einer oberflächlichen Messung auf den Aichungsgeraden den zu n gehörigen Wert $\Delta\omega$ einfach ab; bei genauerer Bestimmung multipliziert man n mit dem durch die Aichung gefundenen Quotienten $\frac{\omega}{n}$.

Auch ohne dass jetzt schon Resultate zum Beweise angeführt werden, geht wohl aus dieser Darstellung hervor, dass diese Art der Messung, die man als „Compensationsmethode“ bezeichnen könnte, eine ausserordentliche Genauigkeit gestattet.

Angenommen, der Widerstand, der zur Bestimmung des Temperaturcoëfficienten Verwendung finden soll, betrage nur 1 Ω, so wird bei einer Erhöhung der Temperatur von 25° auf 100° der Widerstand nur um etwa 0,3 Ω steigen.

Diese geringe Zunahme dürfte in verschiedenen Intervallen mit der Brückenmethode schon ziemlich schwer zu bestimmen sein. Hier jedoch ist — wenigstens theoretisch — kaum eine Grenze zu ziehen, unter welche der Widerstand des Messdrahtes nicht sinken dürfte. Die Aichung wird dann eben mit den entsprechenden Normalwiderständen ausgeführt. Die an und für sich geringe Zunahme lässt im Verlaufe der Messung die Nadel die ganze Skala passieren, gestattet also bei den einzelnen Werten die genauesten Ablesungen.

Bevor wir zu den Resultaten übergehen, welche mit Hülfe der Compensationsmethode gefunden wurden, dürfte es am Platze sein, die benutzten Apparate sowie die ganze Versuchsanordnung im einzelnen zu beschreiben.

II. Teil.

Zur Messung wurde ein Wiedemann'sches Spiegelgalvanometer [1]) von Edelmann in München benutzt, das auf einer festen, für sich allein fundierten Granitsäule aufgestellt war, so dass Erschütterungen ausgeschlossen waren. Dasselbe trägt, da es im allgemeinen als Strominstrument benutzt wird, zu beiden Seiten des Magnets verschiebbare Spulen, die verschiedene Combinationen in der Schaltung zulassen.

Bei diesen Versuchen diente es jedoch als Magnetometer [2]). Die vordere Spule war daher ganz entfernt, um das Solenoid dem Magnet möglichst nähern zu können; welche Verwendung die andere Rolle fand, wird weiter unten erwähnt werden.

Die Magnetnadel ist nach den Angaben von Sauerwald [3]) durch einen Stahlring — hier von 19 mm Durchmesser — ersetzt. Derselbe hat gegenüber den von W. Weber [4]) zuerst verwendeten Stahlscheiben den Vor-

---

[1]) Kittler: Handbuch der Electrotechnick. Bd. I, §§ 134, 135.

[2]). Kittler: § 111, Fig. 111. Wiedem. Ann. 15,552. 1882.

[3]) Kittler, § 120. Fig. 119.

[4]) Kittler, § 120.

zug, dass das Trägheitsmoment des schwingenden Systems und dadurch die Schwingungsdauer selbst verkleinert wird.

Die Ausschläge wurden mit einem Fernrohre von Edelmann abgelesen, das eine 80 cm. lange Skala mit Millimeterteilung trug. Der Abstand der letzteren vom Spiegel des Galvanometers betrug genau 4 Meter.

Es erübrigt noch, die auf Tafel 1 skizzierte Vorrichtung, mittelst deren die zu untersuchende Drahtsorte auf die gewünschte Temperatur gebracht wurde, genauer zu beschreiben.

Da bei Wasser stets die Gefahr des Nebenschlusses nahe liegt, wurde zur Erwärmung Petroleum verwendet, welches ein 40 cm langes Glasrohr (Gl.) von 6 cm Durchmesser füllte. Die beiden Öffnungen waren durch Gummipfropfen[1]) (Pf.) verschlossen, welche je 3 Durchbohrungen aufwiesen, davon eine im Mittelpunkte. Durch diese war auf der einen Seite ein Glasstab (S.), auf der andern ein Thermometer (T.) mit $^1/_5$ Centigradeinteilung eingeführt. Beide reichten etwa 12 cm in das Innere der Röhre hinein und dienten als Träger für ein Glasrohr (gl.) von 1,0 cm Durchmesser, auf welches der Draht, dessen Temperaturcoëfficient bestimmt werden

[1]) Dieselben zeigten sich später als nicht sehr geeignet; sie wurden nämlich von dem warmen Petroleum derart angegriffen, dass eine Erwärmung über 75° nicht angängig war. Letztere genügte jedoch in diesem Falle.

sollte, aufgewickelt war. Diese Lagerung bietet gegen eine directe Führung durch den Korken den Vorteil, dass die zu untersuchenden Drähte, welche alle auf gleich dimensionierte Glasröhren aufgewickelt sein mögen, jederzeit schnell und bequem ausgewechselt werden können. Ausserdem kann das Petroleum bei dieser Anordnung auch die Innenwand der Versuchsspule bestreichen. In die zweite der oben erwähnten Durchbohrungen waren beiderseitig knieförmig gebogene Glasrohre (Z u. A) geführt. Das eine derselben stand durch einen längeren Gummischlauch (G) mit dem Petroleumbehälter (P), einer Glasflasche mit Tubus am Boden, in Verbindung, welche etwa das 5fache Volumen der weiten Glasröhre fasste; an das andere schloss sich ein Steigerohr von etwa 40 cm Länge und 1 cm Durchmesser.

Die 3. Durchbohrung diente zur Stromzuführung.

Vor jeder Messung wurde die Röhre durch Senken der Flasche geleert, und in dieser das Petroleum mittels eines an die Lichtleitung angeschlossenen Widerstandes von ungefähr 15 Ω auf die gewünschte Temperatur gebracht. Beim Heben der Flasche floss das Petroleum in die Röhre zurück und stieg, da das Steigerohr unmittelbar unter der oberen Glaswand mündete, in dieses erst dann, wenn die Röhre selber ganz gefüllt war.

Diese Manipulation des Hebens und Senkens wurde jedesmal mehrfach ausgeführt, bis ein in der Flasche befindliches Thermometer völlige Übereinstimmung mit dem eigentlichen Messthermometer im Innern der Spule zeigte.

Die weite Röhre sowohl wie die Flasche waren übrigens mit einem dicken Filzmantel umgeben, so dass die Temperatur während der kurzen Dauer einer Ablesung absolut konstant blieb.

Im weiteren mag die Versuchsanordnung durch nebenstehende Skizze erläutert werden. (Tafel 2).

Als Stromquelle wurde ein Akkumulator (E) benutzt, da es bei der Messung von ausserordentlicher Wichtigkeit war, bis zum Schlusse selbst den geringsten Spannungsabfall zu vermeiden. Bei *m* und *n* teilte sich der Strom in die Kreise I und II, welche durch den gemeinsamen Ausschalter (*a*) unterbrochen werden konnten. Natürlich ist es im Prinzip nicht erforderlich, parallel geschaltete Stromkreise zu verwenden, beim Ausführen der Messungen ist jedoch ein gleichzeitiges Ausschalten beider Kreise durchaus wünschenswert. Bei einseitiger Unterbrechung des Stromes könnte das durch die andere Spule erzeugte Feld den Magneten leicht zu stark beeinflussen und eine übermässig grosse Torsion des Aufhängefadens zur Folge haben.

Im Stromkreise I befand sich conaxial mit dem Magnetringe die oben beschriebene Vorrichtung mit der Versuchsspirale, ausserdem ein Paar Quecksilbernäpfe zur Aufnahme der Normalwiderstände, welche nach Beendigung der Aichung kurzgeschlossen werden konnten.

Zur Compensation im zweiten Stromkreise diente die hintere Spule des Edelmannschen Instrumentes, deren Axe ja ebenfalls mit der des Magnets zusammen-

fällt. Dieselbe eignete sich für die genaue Abgleichung ausserordentlich gut; sie konnte nämlich durch ein Gewinde von sehr geringer Ganghöhe um kleinste Teile verschoben werden. In Reihe damit war ein Stöpselrheostat geschaltet, durch den die erste annähernde Einstellung erfolgte.

Die Versuchsspule konnte zu Anfang jeder Messung zur Widerstandsbestimmung durch besondere Zuleitungen mit einer Wheatstoneschen Brückenkombination in Verbindung gesetzt werden. Das sonst als Magnetometer benutzte Spiegelgalvanometer wurde dann in die Brücke eingeschaltet und als Nullinstrument benutzt.

Der Gang der Untersuchung ist im theoretischen Teile der Abhandlung im Wesentlichen bereits dargelegt worden. Angaben über Einzelheiten werden bei den nachfolgend angeführten Messungen ihren Platz finden.

III. Teil.

Wie wohl stets bei der Festlegung einer neuen Messmethode, bei welcher es ja nicht nur auf eine theoretische Entwickelung, sondern auch auf eine praktische, möglichst einfache Ausführung ankommt, ist auch hierbei mancher vergebliche Versuch gemacht worden, bis die in den vorigen Teilen eingehend behandelte Versuchsanordnung feststand, und die Messung nachstehend aufgeführte Resultate zeitigte.

Aus der grossen Zahl der angestellten Untersuchungen sind vier ausgewählt, die ein vollkommen klares Bild von der Methode entwerfen und zur Beurteilung ihrer Brauchbarkeit genügen.

Verwendung fand bei allen Kupfer, wie es im Handel käuflich ist.

Messung I.

Zur Untersuchung kamen etwa 4½ Meter Kupferdraht von 0,1 mm Durchmesser. Eine oberflächliche Messung hatte bei 10° einen Widerstand von 10,8 Ω ergeben; bei der in Aussicht genommenen Erwärmung bis 75° war also eine Zunahme von 2,67 Ω zu erwarten.

Es wurde nun mittelst eines sehr genauen Stöpselrheostaten von Edelmann ein Widerstand von 2,7 Ω in den Stromkreis der Messspule eingeschaltet, und diese vor dem Instrumente so eingestellt, dass beim Schliessen des Stromes ein möglichst grosser Anschlag erzielt wurde. In diesem Falle glückte es, die Skala bis zu Ende auszunutzen; bei vollständiger Compensierung der Spulenwirkung entsprachen 2,7 Ohm 399,3 Skalenteile.

Nach Ausschalten der Vergleichswiderstände wurde der Widerstand des Messdrahtes genau bestimmt; er ergab:

10,752 Ω

bei einer Temperatur von 10,20°.[1]) Die letztere blieb während der Aichung infolge der dicken Filzumhüllung in der Röhre vollständig konstant.

Die Aichung wurde wiederholt und mit der grössten Aufmerksamkeit ausgeführt, da die Genauigkeit der ganzen Messung von ihr abhängt. Wie gezeigt, muss die Aichungskurve eine Gerade ergeben, sie lässt sich daher sofort auf ihre Richtigkeit prüfen.

Tabelle Ia giebt die Werte der Aichung; die dazu gehörige Gerade I auf Tafel 3 zeigt, dass nicht ein einziger Wert herausfällt.

Die Messung selbst macht verhältnismässig wenig Schwierigkeit. Alle Vergleichswiderstände werden aus

---

1). Die angegebenen Temperaturen sind alle bereits nach einem Normalthermometer corrigiert.

dem Kreise I (cf. Tafel 2) entfernt, der jetzt ausser der Stromquelle nur noch das Solenoid enthält. Der Strom wird geschlossen, und ein Blick in das Fernrohr überzeugt uns, dass die Nadel noch auf O steht, die Compensation also in Ordnung ist.

Hierauf wurde in der bereits geschilderten Weise erwärmt; wir waren bemüht, immer von 5 zu 5 Grad C. weiterzugehen. Sobald die Temperatur konstant blieb, wurde der Ausschlag des Magnetometers abgelesen, und gleichzeitig das Thermometer beobachtet.

Die Resultate dieser Messung sind mit Hinweglassung der Zwischenrechnungen in Tabelle Ib gegeben. Die 1. Kolumne enthält die corrigierten Temperaturen des Petroleumbades; die 2. die entsprechenden Ausschläge n. aus letzteren ergeben sich durch Multiplizieren mit der durch die Aichung gefundenen Konstanten die Widerstandszunahmen Δw, welche in der 3. Reihe folgen; die Werte für α, welche sich nach der Formel: $\alpha = \frac{\Delta w}{w_0 \,.\, \Delta t}$ berechnen, giebt die 4. Spalte.

Tabelle Ia.

(Aichung). Tafel 3.

Nr.	Δw	n
1.	0,1	14 95
2.	0,2	29,8
3.	0,3	44,3
4.	0,4	59,2
5.	0,5	$73,9_5$
6.	0,6	88,8
7.	0,7	103,5
8.	0,8	118,2
9.	0,9	133,1
10.	1,0	147,9
11.	1,2	177,5
12.	1,5	221,8
13.	1,8	266,2
14.	2,0	295,6
15.	2,2	325,4
16.	2,5	369,7
17.	2,7	399,3

Tabelle I b.

Nr.	t	n	$w - w_0$	α
1.	10,20			
2.	15,41	31,0	0,20961	0,003749
3.	19,84	57,3	0,38810	3744
4.	25,30	89,8	0,60720	3740
5.	31,15	$124,7_5$	0,84350	3745
6.	36,05	153,9	1,04062	3744
7.	40,29	173,0	1,16870	3740
8.	46,43	215,8	1,45886	3746
9.	51,13	238,7	1,61400	3747
10.	55,26	268,2	1,81346	3743
11.	59,94	296,0	2,00143	3742
12.	64 69	324,5	2,24521	3745
13.	70,70	360,3	2,43617	3746
14.	75,23	387,4	2,61944	3747

Bei der Darlegung dieser ersten Messungen schien es zweckmässig, etwas ausführlicher auf den Gang derselben einzugehen. Die folgenden sind dieser ganz analog; es werden daher ausser den Daten und Resultaten nur einige notwendige Erläuterungen gegeben werden.

Messung II.

Länge des Drahtes 2 m, Durchmesser 0,3 mm.

Zu Beginn der Messung:

$$t_0 = 12{,}22^0,\ w_0 = 5{,}342\ \Omega.$$

Wahrscheinliche Zunahme

$$\Delta w = 1{,}23\ \Omega.$$

Tabelle II a.

(Aichung.)

Nr.	Δw	n
1.	0,1	28,9
2.	0,2	57,8
3.	0,4	115,7
4.	0,6	173,6
5.	0,8	231,4
6.	1,0	289,3
7.	1,1	318,2
8.	1,3	376,1

Tabelle II b.

Nr.	t	n	$w - w_0$	α
1.	12,22			
2.	16,39	24,3	0,08400	0,003771
3.	20,04	45,6	0,15764	3
4.	26,31	82,2	0,28415	5
5.	29,89	103,1	0,35674	9
6.	35,00	132,9	0,45940	5
7.	41,34	169,9	0,58730	6
8.	44,54	188,5	0,65159	4
9.	50,12	221,2	0,76465	7
10.	54,90	248,9	0,87039	5
11.	60,57	282,0	0,97482	4
12.	66,14	314,7	1,08783	7
13.	69,37	333,3	1,15216	3
14.	74,03	360,8	1,24726	8

Messung III.

Länge des Drahtes 5½ m, Durchmesser 0,5 mm.

Zu Beginn der Messung:

$$t_0 = 15{,}02\,^0,\ w_0 = 0{,}5\ \Omega.$$

Wahrscheinliche Zunahme

$$\Delta w = 0{,}1\ \Omega.$$

Für so kleine Intervalle schien die Genauigkeit eines Stöpselrheostaten doch nicht ausreichend. Wir zogen es daher vor, uns bei der Aichung mit 3 Werten zu begnügen, die uns die Combination aus den zwei vorhandenen, amtlich geaichten Normalwiderständen — 0,1 und 0,01 Ω — gestatteten

Dabei ergab: 0,01 Ω $n = 35{,}9$

0,10 Ω $n = 359{,}5$

0,11 Ω $n = 395{,}5$.

Tabelle III.

Nr.	t	n	$w - w_0$	α
1.	15,02			
2.	18,91	26,6	0,007414	0,003783
3.	24,34	63,9	0,017775	6
4.	30,05	103,0	0,028651	4
5.	35,16	138,0	0,038388	3
6.	39,54	168,3	0,046814	9
7.	44,00	198,7	0,055275	6

Nr.	t	n	$w - w_0$	α
8.	49,02	232,8	0,064841	0,003780
9.	53,87	266,2	0,074048	3
10.	60,32	310,5	0,086370	5
11.	66,07	349,9	0,097339	4
12.	69,89	376,2	0,104645	6

Messung IV.

Länge des Drahtes 1¾ m, Durchmesser 0,9 mm.

Zu Beginn der Messung:

$$t_0 = 11{,}29\,^0,\ w_0 = 0{,}0551\ \Omega.$$

Erwartete Zunahme

$$\Delta w = 0{,}012\ \Omega.$$

Für diese geringe Widerstandszunahme musste für die Aichung ein einziger Wert genügen, nämlich der Ausschlag von $n = 324{,}5$, den 0,01 Ω hervorrief.

Wie jedoch die Aichungsgeraden I, II, III auf Tafel 3 zeigen, fällt nicht ein Punkt heraus; wir glaubten daher bei dieser Messung unsere Untersuchungen auf diesen einen Wert aufbauen zu dürfen, besonders, da bei wiederholtem Ein- und Ausschalten der Vergleichswiderstand stets denselben Ausschlag hervorrief.

Tabelle IV.

Nr.	t	n	$w - w_0$	α
1.	11,20			
2.	16,38	34,8	0,0010724	0,003757
3.	20,25	60,7	0,0018706	1
4.	24,31	88,0	0,0021541	4
5.	29,87	125,3	0,0038703	4
6.	35,00	159,7	0,0049215	3
7.	39,20	188,1	0,0057967	7
8.	46,14	234,5	0,0072265	3
9.	50,90	266,6	0,0082158	6
10.	54,24	288,8	0,0089000	3
11.	59,36	323,1	0,0099573	2
12.	63,08	348,4	0,0107367	6
13.	68,21	383,0	0,0118029	8

IV. Teil.

Wer die vorstehend aufgeführten Resultate einer Prüfung unterzieht, wird zugeben müssen, dass die Genauigkeit nichts zu wünschen übrig lässt.

Bei der unter I angeführten Messung z. B. ergiebt sich ein Mittelwert:

$$\alpha = 0{,}003745,$$

davon weicht sowohl der Maximal- wie der Minimalwert nur 0,1 % ab.

Bei dieser Uebereinstimmung der Werte untereinander bis auf die 5. Decimale erschien es mir überflüssig, den Mittelwert nach der Methode der kleinsten Quadrate zu bilden.

Ausserdem haben die vorliegenden Messungen ja nicht den Zweck, den Temperaturcoëfficienten aufs neue zu bestimmen, sie sollen vielmehr überhaupt den Beweis liefern, dass derselbe sich auf diese Weise sicher und gut finden lässt.

Bei einem Vergleiche der Compensationsmethode mit früheren kann nur die Arbeit von Aug. Matthiessen und M. v. Bose in Betracht kommen.

In derselben findet sich die Angabe, dass die Widerstände mit Hilfe der Brücke auf 0,1 % genau abgeglichen wurden.

Wir wollen nun einmal berechnen, wie viel durch diesen Fehler die Richtigkeit des Endresultates beeinträchtigt wird: natürlich nehmen wir den ungünstigsten Fall, das heisst so, dass die procentualen Fehler von w_t und w_0 sich nicht etwa aufheben, sondern addieren.

Die Temperaturzunahme $t_t - t_0$ wollen wir zur Vereinfachung als absolut richtig gemessen annehmen.

Darnach ergiebt sich, wenn wir $w_t - w_0$ mit Δw, $t_t - t_0$ mit Δt bezeichnen:

$$\alpha = \frac{\Delta w}{w_0 \,.\, \Delta t}$$

$$\alpha + d\alpha = \frac{\Delta w + d\,\Delta w}{(w_0 - d w_0) \,.\, \Delta t}$$

$$d\alpha = \frac{\Delta w + d\,\Delta w}{(w_0 - d w_0)\,\Delta t} - \frac{\Delta w}{w_0 \,.\, \Delta t}$$

$$\frac{w_0 \,.\, d\,\Delta w + \Delta w \,.\, d w_0}{w_0\,(w_0 - d w_0)\,\Delta t}$$

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{(w_0 \,.\, d\,\Delta w + \Delta w\, d w_0)\, w_0 \,.\, \Delta t}{\Delta w \,.\, w_0\,(w_0 - d w_0) \,.\, \Delta t}$$

$$= \frac{w_0\, d\,\Delta w + \Delta w \,.\, d w_0}{(w_0 - d w_0)}$$

$$= \frac{1000 \,.\, 2 + 1000 \,.\, 1}{1000\,(1000 - 1)}$$

$$\frac{3}{999} \backsim \underline{0{,}3\ \%}.$$

Für α erhalten wir also einen Fehler von ungefähr 0,3 %.

Stellen wir dieselbe Rechnung bei der neuen Methode an! Diese bietet den Vorzug, dass die Widerstandszunahme nicht durch Rechnung gefunden, sondern direct bestimmt wird; und die Aichungsgeraden gestatten uns wohl, dieselbe als absolut richtig anzunehmen. Die Rechnung des procentualen Fehlers von α gestaltet sich dann folgendermassen:

$$\alpha = \frac{\Delta w}{w_0 \Delta t} = \frac{C}{w_0}$$

$$\alpha + d\alpha = \frac{C}{w_0 - dw_0}$$

$$d\alpha = \frac{1}{w_0 - dw_0} - \frac{1}{w_0}$$

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{dw_0}{w_0 - dw_0}$$

$$= \frac{1}{100 - 1} - \frac{1}{99}$$

$$\backsim 0{,}1\ \%.$$

Die Genauigkeit des Endresultates entspricht also derjenigen, mit welcher zu Anfang der Widerstand des Versuchsdrahtes gemessen wurde. Es ist nicht ohne Bedeutung, dass nur die Anfangsmessung massgebend ist, denn es ist doch klar, dass man dieselbe durch häufiges Wiederholen unter verschiedenen Umständen fast ganz genau ausführen kann, wenigstens viel genauer, als es selbst bei der grössten Vorsicht im Verlaufe der Untersuchung möglich ist. Vor Beginn der Erwärmung

ist hinreichend Zeit für die Widerstandsabgleichung vorhanden, später jedoch soll sie mit möglichster Geschwindigkeit ausgeführt werden, ehe sich die Temperatur ändern kann.

Damit kommen wir auf einen weiteren Vorzug dieser Methode. Bei gut gedämpftem Instrumente wird sich bei einer bestimmten Temperatur die Nadel sehr schnell auf den richtigen Wert einstellen, und ein Moment genügt zur Ablesung des Ausschlages. Die vorhin gemachte Annahme, dass sich die Temperaturmessung genau ausführen lässt, trifft also hier viel eher zu als bei der alten Methode, bei welcher notwendiger Weise einige Zeit verstreicht, bis die Widerstände durch Verschieben des Contactes abgeglichen sind.

Der grösste Unterschied zwischen beiden Methoden liegt aber doch wohl in der erforderlichen Widerstandshöhe des der Untersuchung zu Grunde gelegten Messdrahtes, auf den wir schon im theoretischen Teile hingewiesen haben. Es fehlen in der Abhandlung von Matthiessen und v. Bose leider Angaben über den verwendeten Draht, soviel steht jedoch fest, dass der Widerstand nicht unter einen gewissen Betrag sinken darf, wenn man eine genaue Messung haben will.

Dass es, wenigstens theoretisch, bei unserer Compensationsmethode eine derartige Grenze nicht giebt, zeigen wohl zur Evidenz die Werte, welche Messung IV ergeben hat. Derselben zu Grunde lag ein Draht von nur 0,05 Ω, die gesammte Zunahme bei Erwärmung bis

auf 70° betrug ungefähr 0,01 Ω — und trotzdem stimmen die Werte von α auf 0,1 % mit einander überein!

Diese Art der Bestimmung müsste sich bei passenden Normalwiderständen sehr gut für Manganin, Constantan etc. eignen, bei denen die Widerstandszunahme so ausserordentlich gering ist. —

Zum Schlusse noch einige Worte über günstige Messbedingungen.

Es ist natürlich zweckmässig, ein starkes Feld zu haben, damit der Ausschlag pro Einheit der Stromänderung, das heisst pro Einheit der Widerstandszunahme, möglichst gross ist. Man erreicht dies einmal durch nahe Aufstellung der Spule vor dem Magneten, andrerseits durch einen starken Strom, der natürlich das für den verwendeten Draht zulässige Mass nicht überschreiten darf. Vorteilhaft ist es, die Windungen übereinander zu legen, damit sie zur Erzeugung des Feldes ausgenutzt werden.[1])

In Rücksicht auf eine gleichmässige Erwärmung ist es allerdings kaum ratsam, mehr als zwei Lagen anzuwenden, falls man es nicht etwa mit sehr dünnem, lose aufgewickeltem Draht wie bei Messung I zu thun hat. Bei guter Umspinnung und Verwendung von Öl oder Petroleum ist ein Kurzschluss unter den einzelnen Windungen trotzdem nicht zu befürchten.

[1]) Die Gleichung für $\mathfrak{H}$ enthält bekanntlich den Factor $\frac{n}{l}$.

Die Grenzen des zulässigen Widerstandes sind ziemlich weit gesteckt, wie die angeführten Resultate beweisen. Man darf nicht übersehen, dass es — auch im Einklang mit dem über die Stromstärke Gesagten — möglich ist, dickere Drahtsorten zu verwenden, als wie es wegen des geringen Widerstandes bei der Brückenmethode angängig ist.

Also gerade Drahtsorten, wie sie in der Technik Verwendung finden, sind sehr gut zur Messung zu benutzen. Aber auch nach oben hin ist die Widerstandsgrenze nicht durch die mitgetheilten Versuche erschöpft. Erscheint uns bei grösserer Zunahme des Widerstandes die Genauigkeit bei einer Aichung in der erwähnten Weise nicht ausreichend, so können wir durch eine Abänderung derselben viel genauere Werte erhalten.

Um ein beliebiges Beispiel zu wählen, werde angenommen, eine überschlägige Rechnung habe eine Zunahme von $n \cdot \rho\,\Omega$ in Aussicht gestellt. Wir zerlegen dann die ganze Messung in n Teile und aichen das Instrument bei einer bestimmten Anfangstemperatur, für welche der Widerstand bekannt ist, in der Art, dass wir ρ als Grenze der Zunahme betrachten, und bei der Erwärmung bis zu diesem Werte die ganze Skala ausnutzen. Jetzt wird die Versuchsspirale auf der mittlerweile erreichten Temperatur erhalten und ihre Wirkung auf den Magnetring von neuem auskompensiert. Dieser Manipulation folgt eine neue Aichung des Instruments für das Intervall von ρ bis 2ρ. Ist dieser

Wert erreicht, wird wieder kompensiert und für die nächsten Ablesungen geaicht, bis schliesslich der Grenzwert erreicht ist.

Während also vorhin die Skala während der ganzen Messung nur einmal bestrichen wurde, verteilen sich hier die Ablesungen auf eine n fache Skalenlänge.

Nachdem zu Eingang dieser Arbeit gesagt war, dass die Bestimmung des Temperaturcoëfficienten gelöst, mag es überflüssig erscheinen, überhaupt noch diese neue Methode anzugeben.

Einmal aber gewinnt heutzutage die Messung des Temperaturcoëfficienten neues Interesse, da man diesen nun umgekehrt zur Bestimmung hoher Temperaturen verwendet. Dann schien mir die Arbeit aus dem Grunde der Veröffentlichung wert zu sein, weil ich aus eigener Erfahrung weiss, wie mühsam Messungen nach der alten Methode auszuführen sind, und wie selten sie zu vollkommen befriedigenden Resultaten führen. Haben doch die beiden obengenannten Physiker selber ein volles Jahr für ihre Untersuchungen gebraucht!

Ich hoffe, auch ungeübteren Praktikern durch diese Compensationsmethode eine Möglichkeit an die Hand zu geben, Bestimmungen des Temperaturcoëfficienten auszuführen. Vielleicht schafft sie denen eine Erleichterung, welche mit Kittler sagen:

„Die Ermittelung des Temperaturcoëfficienten ist umständlich und schwierig.“

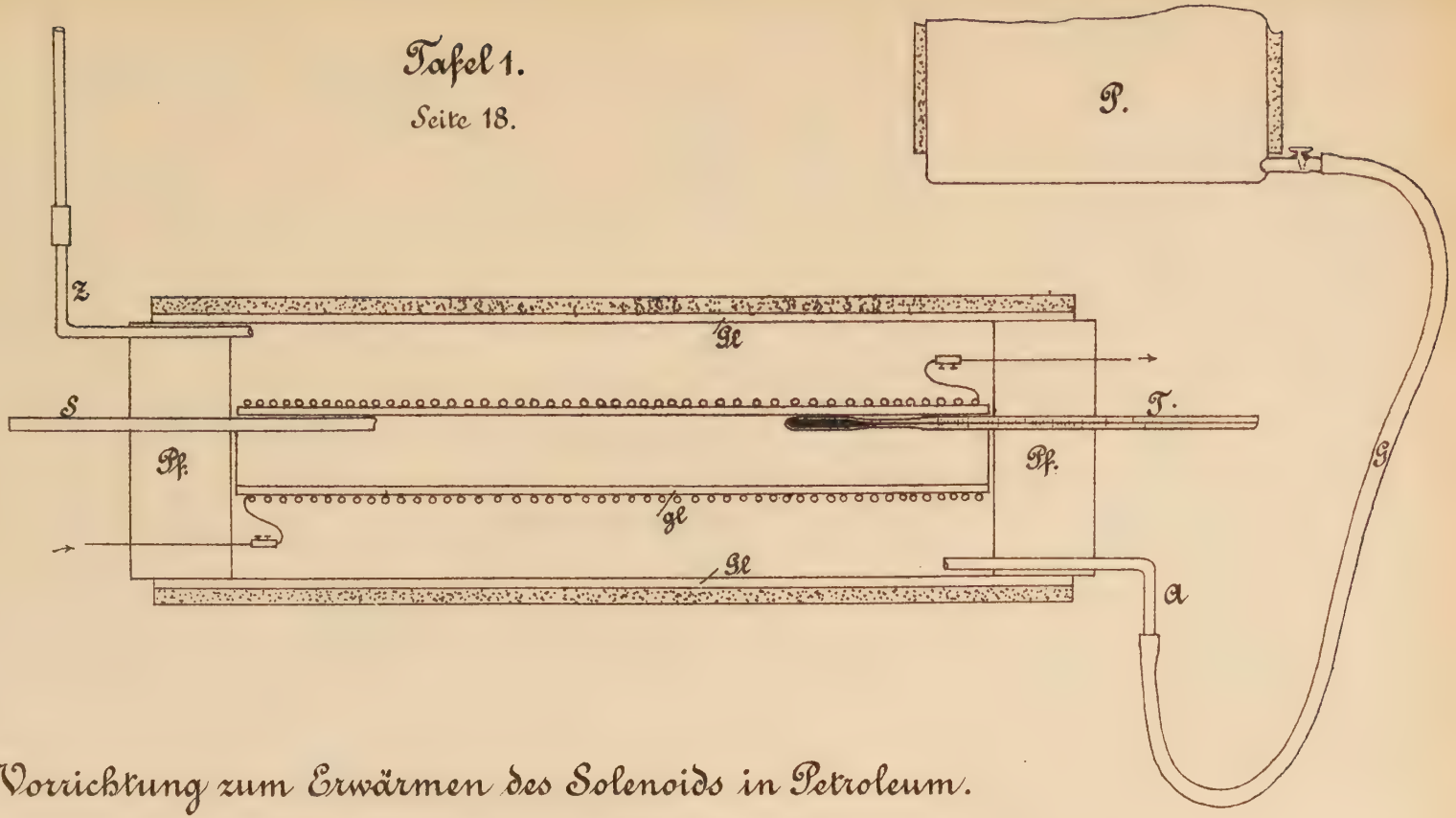
Die Untersuchungen, die der Abhandlung zu Grunde liegen, wurden im Physikalischen Institute der Universität Rostock ausgeführt.

Der Director desselben, Herr Professor Dr. L. Matthiessen, hat mir die dazu nötigen Instrumente und Apparate mit grösster Bereitwilligkeit zur Verfügung gestellt und mir überhaupt während meiner Arbeitszeit stets freundliches und herzliches Entgegenkommen gezeigt.

Es sei mir gestattet, ihm an dieser Stelle meinen wärmsten Dank auszusprechen.

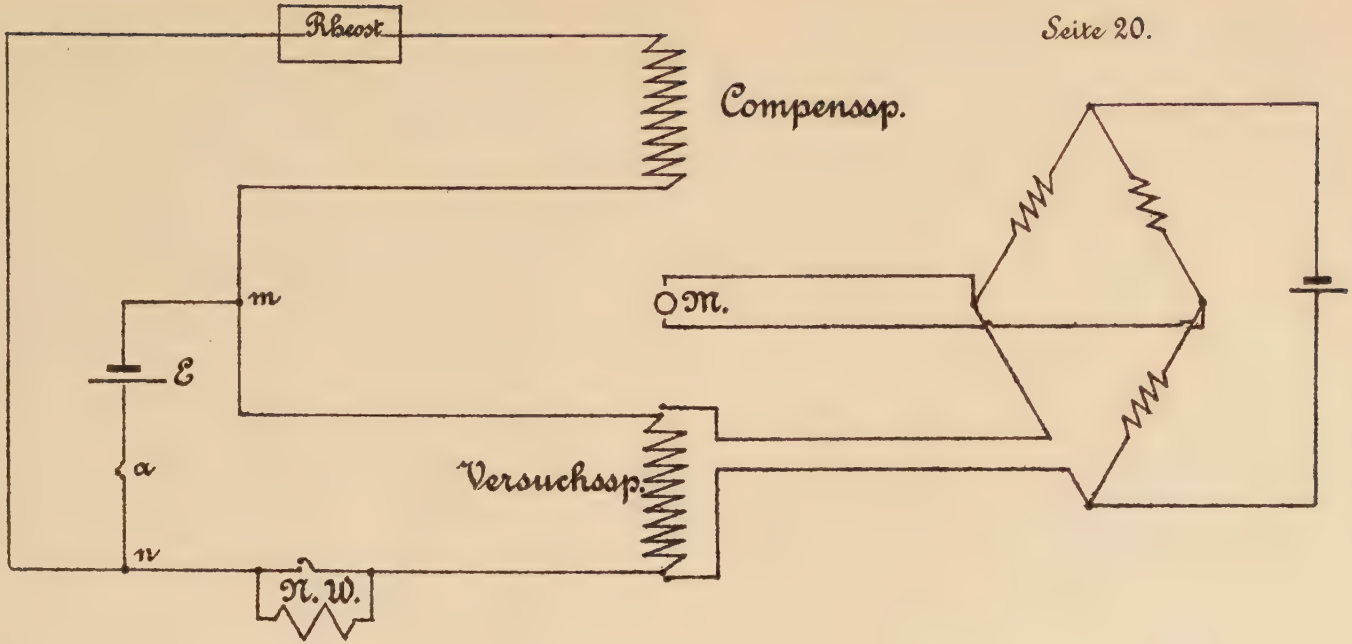
Tafel 1.

Seite 18.



Vorrichtung zum Erwärmen des Solenoids in Petroleum.

(Grössenverhältnisse in der Skizze willkürlich gewählt.)



Schaltungsschema.